**Journal of Agricultural Machinery**

Homepage: https://jame.um.ac.ir

**Research Article**
**Vol. 14, No. 2, 2024, p. 177-195**

# Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System

**J. Seifi Laleh[1], H. Samimi Akhijahani[2*], P. Salami[2]**

1- Graduate Student of Renewable Energies, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)

| Received: 17 December 2022<br>Revised: 28 January 2023<br>Accepted: 20 February 2023<br>Available Online: 25 February 2023 | **How to cite this article:**<br>Seifi Laleh, J., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2024). Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System. *Journal of Agricultural Machinery, 14*(2), 177-195. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138 |
|---|---|

## Introduction

With increasing the world's population, the demand for supply water resources is also increasing. Nevertheless, climate change has severely impacted the accessibility of fresh water resources. Consequently, researchers have been focusing on producing drinkable water from seas and oceans. Iran, with its significant levels of solar radiation and access to open water from the north and south, is an ideal country for fresh water production. Using solar water desalination systems is a reliable and cost-effective solution for producing drinking water from salt water sources. The purpose of this research is to enhance the performance of the solar water desalination system by using the latent heat storage system and a solar tracking system. In this experimental setup for fresh water production, water was used as the working fluid, while a parabolic collector functioned as the source of thermal energy.

## Materials and Methods

The solar water desalination system was designed and built on a laboratory scale at the University of Kurdistan, and then the necessary experiments were carried out. The flowing fluid (water) inside the spiral tube in the tank is pumped into the absorber tube of the parabolic collector. Inside the receiver tube, there is a spiral copper tube with a 7 cm pitch, which contains paraffin. The parabolic mirror reflects the sunlight onto the receiver tube, causing the working fluid, water, to heat up. The cooling process is achieved using a specific source located in the upper section of the distillation tank. In this case, the steam droplets in the tank hit the bottom surface of this cooling tank, which has the shape of an inverted funnel, leading to condensation. The study was conducted over four consecutive days, from 10:00 to 14:00, under identical conditions from August 24th to August 27th, 2022. It took place at the Renewable Energy Laboratory, University of Kurdistan in Sanandaj, Iran, and was conducted for three different volume flow rates of fluid: 1.9, 3.1, and 4.2 $l.min^{-1}$ with phase change materials (PCM) and 4.2 $l.min^{-1}$ without phase change materials (WOPCM); the pump's maximum flow rate was 4.2 $l.min^{-1}$. Variations of outlet temperature, thermal efficiency, desalination efficiency, and produced water were investigated under different conditions.

## Results and Discussion

The results reveal that by decreasing the pitch of the spiral tube, there is an increase in the amount of heat captured, due to the increase in the Nusselt number. At the beginning of data collection, a significant amount of the energy that enters the receiver tube is absorbed by both the phase change material and the spiral tube inside the receiver and as a result, the initial air temperature is lowered. The highest temperature of salt water occurs



https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138

when the fluid is flowing at a rate of 4.2 $l.min^{-1}$, while the lowest temperature is observed at a flow rate of 1.9 $l.min^{-1}$. With a flow rate of 4.2 $l.min^{-1}$, the absorbent tube rapidly transfers the absorbed heat to the salt water chamber through the fluid. The input energy to the tank has increased from 1.53 to 2.83, 1.14 to 2.18, and 0.73 to 1.48 MJ for fluid flow rates of 4.2, 3.1, and 1.9 $l.min^{-1}$, respectively. At a flow rate of 4.2 $l.min^{-1}$, the thermal efficiency of the system without phase change materials (3.51%) is lower compared to the case with phase change materials (5.02%). Moreover, using a solar tracking mechanism increased the thermal efficiency of the collector by 9.86% compared to the system using a photocell sensor. Based on the water quality values, it can be stated that the level of dissolved solids in the water sample has been significantly decreased. This indicates that the water can be used for drinking.

## Conclusion

In this research, the process of thermal changes in a solar water desalination system using PCM was investigated. The obtained results demonstrate that the use of PCM improved the thermal efficiency of the collector and the water obtained from the current system is safe for consumption. Furthermore, by implementing a solar panel tracking system, the efficiency of the solar collector is improved.

**Keywords**: Drinking water, Solar collector, Solar tracker, Thermal efficiency, Water quality

## Symbols and abbreviations

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $A_c$ | سطح کلکتور<br>Collector area | $m^2$ | $\dot{Q}_{cove}$ | نرخ انرژی انتقال‌یافته در اثر همرفت<br>Convected heat flux | $J.s^{-1}$ |
| $c_p$ | ظرفیت گرمای ویژه<br>Specific heat capacity | $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ | $\dot{Q}_u$ | نرخ انرژی حرارتی دریافتی<br>Received useful energy | $J.s^{-1}$ |
| D | قطر لوله<br>Tube diameter | m | Pr | عدد پرانتل<br>Prandtl number | - |
| $E_{elc}$ | انرژی الکتریکی<br>Electrical energy | J | Re | عدد رینولدز<br>Reynolds number | - |
| $F_R$ | پارامتر اتلاف حرارت<br>Heat loss coefficient | - | $T_i$ | دمای ورودی<br>Intlet temperature | $^{o}C$ |
| $h_c$ | ضریب انتقال حرارت همرفت<br>Convective heat transfer coefficient | $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ | $T_O$ | دمای خروجی<br>Outlet temperature | $^{o}C$ |
| $h_{fg}$ | گرمای نهان تبخیر آب<br>Latent heat of water evaporation | $kJ.kg^{-1}$ | $t_c$ | ضخامت دیواره<br>Wall thickness | m |
| $I_o$ | شدت تابش خورشیدی<br>Solar radiation | $W.m^{-2}$ | $U_L$ | ضریب اتلاف حرارت کلی<br>Total heat loss coefficient | $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ |
| $k_w$ | ضریب انتقال حرارت<br>Conductive heat transfer coefficent | $kg.s^{-1}$ | V | حجم سیال<br>Fluid volume | $m^3$ |
| $m_{w,ev}$ | جرم آب تبخیری<br>Evaporated water mass | kg | α | ضریب جذب<br>Absorption factor | - |
| $\dot{m}$ | جرم سیال کاری<br>Working fluid mass | – | η | بازده گرمایی جمع‌کننده<br>Collector thermal efficiency | - |
| Nu | عدد ناسلت<br>Nusselt number | J | $\eta_{des}$ | بازده تبخیر آب<br>Evaporation efficiency | - |
| $Q_w$ | انرژی مورد نیازبرای تبخیر<br>Required thermal energy for evaporation | J | µ | ویسکوزیته سیال<br>Fluid viscosity | $m^2.s^{-1}$ |
| $Q_m$ | مجموع انرژی مورد نیاز برای تبخیر آب<br>Total required energy for evaporation | $J.s^{-1}$ | ρ | دانسیته جرمی<br>Mass density | $kg.m^3$ |
| $\dot{Q}_f$ | گرمای انتقالی از جمع‌کننده به سیال<br>Transferred heat to working fluid | $J.s^{-1}$ | τ | ضریب انتشار<br>Emission factor | - |
| $\dot{Q}_{cond}$ | نرخ انرژی انتقال‌یافته هدایتی<br>Conducted energy flux | $J.s^{-1}$ | | | |

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱٤، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۳، ص ۱۹۵-۱۷۷

# ارزیابی بازده انرژی جمع‌کننده سهموی مجهز به مواد تغییرفازدهنده درون لوله دریافت‌کننده در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی

ژینا سیفی لاله[۱]، هادی صمیمی اخیجهانی[۲*]، پیمان سلامی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

## چکیده

استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی یک راهکار مناسب، با صرفه اقتصادی برای تولید آب شرب از منابع آب شور است. هدف از انجام این تحقیق افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از سامانه ذخیره‌ساز گرمای نهان انرژی خورشیدی و سامانه ردیاب پنلی است. با توجه به این‌که به دلیل نوسانات شدت تابش خورشیدی هدررفت حرارتی از جمع‌کننده خورشیدی افزایش می‌یابد، استفاده از مواد تغییرفازدهنده راه‌حل مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی در ساعات اوج و آزاد نمودن در زمان کاهش و یا نبود شدت تابش خورشیدی است. به این منظور ماده تغییرفازدهنده به‌صورت لوله‌ی مارپیچ ۶ میلی‌متری با گام ۷ سانتی‌متر درون لوله کانونی قرار گرفت. جهت ارزیابی عملکرد حرارتی سه دبی جریان برای سیال کاری ۱/۹، ۳/۱ و۴/۲ لیتر بر دقیقه (با مواد تغییرفازدهنده) و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده در چهار روز متوالی از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییرفازدهنده بیشترین راندمان حرارتی را در دبی۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن با دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه بوده است. نتایج نشان داد استفاده از مواد تغییرفازدهنده باعث بهبود راندمان حرارتی به میزان ۳/۰۵ درصد می‌گردد. آب شیرین تولیدی در مدت زمان ۴ ساعت، ۰/۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت بود و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باعث کاهش سختی موجود در آب شرب شده بود.

**واژه‌های کلیدی:** آب شرب، بهره‌وری حرارتی، جمع‌کننده خورشیدی، ردیاب خورشیدی، کیفیت آب

## مقدمه

یکی از نوشیدنی‌های که مصرف روزانه آن، برای ادامه حیات و سلامتی انسان و همچنین تمام موجودات زنده از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد، آب است. افزایش جمعیت و صنعتی شدن و همچنین تقاضا برای کاربردهای مختلفی نظیر کشاورزی و خانگی، منجر به تولید آب‌شیرین زیاد شده است. مصرف آب یکی از معیارهای اصلی ارزیابی تمدن انسان‌ها است (Panchal, Patel, Elkelawy, & Bastawissi, 2019). برای تولید آب شیرین در کره زمین، می‌توان به‌طور مستقیم از دریاچه‌ها، رودخانه و یخچال‌های طبیعی بهره گرفت. اگرچه آب زیرزمینی به مقدار اندک در دسترس قرار گرفته است، اما همین مقدار اندک نیز بایستی پیش از استفاده تصفیه شود. از طرف دیگر دریاها و اقیانوس‌ها حاوی آب‌شور بوده و از این جهت آب آنان قابل استفاده برای مصارف خانگی و به دلیل خورنده‌بودن قابل استفاده برای مصارف صنعتی نیست. افزایش گرمایش جهانی و شوری منابع آب طبیعی قابل آشامیدن، جامعه را به سمت کشف روش‌های هوشمندانه برای استفاده مناسب از منابع آب سوق می‌دهد. انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است که استفاده از آن با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی و تقاضای جهانی برای کاستن آلودگی‌های زیست‌محیطی افزایش یافته است.

یکی از موضوعات مهمی که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، بحث انرژی و نحوه‌ی تأمین آن برای مصارف مختلف در صنعت و کشاورزی است. با توجه به تداوم افزایش نرخ جمعیت، افزایش مصرف آب، اتمام سوخت‌های فسیلی و هم‌چنین افزایش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها (افزایش آلودگی به میزان ۸ ppm در سال و به‌وجود آمدن پدیده گرمایش

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h.samimi@uok.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138

جهانی) که برای تولید آب شیرین صرف می‌شود، تحقیقات اخیر را به سمت استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. در دهه‌های اخیر انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از موضوعات جذاب در بین محققان حوزه انرژی برای استفاده در زمینه‌های مختلف محسوب می‌شود. از نظر در دسترس بودن و فراوانی پایدار، انرژی خورشیدی با ارزش‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر است (Abu-Arabi, Al-harahsheh, Mousa, & Alzghoul, 2018).

با توجه به استانداردهای بین‌المللی برای مناطقی که میانگین انرژی تابشی خورشید، در روز بالاتر از ۳/۵ کیلووات ساعت می‌باشد، استفاده از سامانه‌های مختلف برای مهار انرژی خورشیدی از جمله جمع‌کننده خورشیدی برای مصارفی نظیر آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی صرفه اقتصادی خواهد داشت (Kalogirou *et al.*, 2005). ایران با میانگین انرژی تابشی ۴/۵ کیلووات ساعت در روز و ۳۲۰۰ ساعت بر سال (Edalati, Ameri, & Iranmanesh, 2015) یکی از مستعدترین مناطق برای بهره‌وری از تابش خورشیدی مانند آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است. با توجه به این‌که میزان شدت تابش خورشید در طول ساعات روز متغیر بوده و لازم است از انرژی خورشیدی که به جمع‌کننده می‌رسد، استفاده حداکثری نمود، استفاده از سامانه‌هایی نظیر ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و مواد تغییرفازدهنده می‌تواند منجر به افزایش بازده حرارتی سامانه گردد. با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساعات اوج تابش، عمل ذخیره‌سازی به‌صورت گرمای نهان انجام شده و در مواقعی که تابش خورشیدی افت پیدا می‌کند و یا وجود ندارد، انرژی ذخیره‌شده در سیال و مواد تغییرفازدهنده آزاد شده و مورد استفاده قرار گیرد. در ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای نهان، جذب یا آزادسازی حرارت در دمای تغییر فاز مواد صورت می‌پذیرد. ذخیره‌ی گرمای نهان عبارت است از جذب و آزاد کردن حرارت هنگامی که یک ماده‌ی ذخیره‌کننده از یک فاز به فاز دیگر در دمای تقریبا ثابت تغییر حالت می‌دهد. در ذخیره‌سازی به‌صورت گرمای نهان، از مواد تغییرفازدهنده استفاده می‌شود. با بررسی‌های انجام‌گرفته، ذخیره انرژی به‌صورت گرمای نهان، کارآمدترین روش ذخیره‌ی انرژی گرمایی است (Pielichowska & Pielichowski, 2014). در پژوهشی تاثیر مقدار ذوب شدن و ضخامت مواد تغییرفازدهنده[1] (PCM) بر روی پراکندگی دمایی در مواد تغییرفازدهنده بررسی شد. نتایج نشان داد زمان ذوب شدن به‌صورت خطی با مقدار PCM تغییر کرده و با کاهش ضخامت PCM عملکرد سامانه افزایش می‌یابد (Rostamizadeh, Khanlarkhani, & Sadrameli, 2012). از مواد تغییرفازدهنده در جمع‌کننده‌های خورشیدی نیز استفاده شده و از طریق آن برای خشک کردن محصول و یا آب‌شیرین‌کن استفاده می‌شود. در جمع‌کننده‌ها PCM به‌صورت لایه‌ای، ورقه‌ای، استوانه‌ای با کروی استفاده می‌گردد، که در هرکدام گرمای نهان باعث می‌شود مجموع انرژی‌گیری بهبود یابد. یک کار شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت در کشور تونس بر روی جمع‌کننده سهموی انجام شد که طی آن جهت افزایش بهره‌وری در هنگام شب برای ذخیره‌سازی حرارتی، PCM در جمع‌کننده قرار داده شد. در این سامانه مخزن آب با استفاده از لایه‌ایی از PCM پوشش داده شد (Chaabane, Mhiri, & Bournot, 2014). در کشور چین پژوهشی انجام شد، که در آن به مطالعه مخازن ذخیره حرارتی خورشیدی مجهز به جمع‌کننده سهموی که مجهز به کره‌های حاوی PCM پرداخته شده بود. در این مطالعه از سه نوع PCM مختلف استفاده شد. ظروف کروی از پلی‌کربنات ساخته شده و مواد PCM استفاده‌شده در درون کره‌ها دارای سه نقطه ذوب متفاوت بودند. با استفاده از این تجهیزات، بهره‌وری سامانه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت (Yang, Zhang, & Xu, 2014). در پژوهشی که بر روی آب‌شیرین‌کن مجهز به جمع‌کننده خورشیدی و PCM انجام شد، نتایج نشان داد که به دلیل مقدار زیاد PCM موجود در سامانه، درجه حرارت آب شور برای مدت زمان طولانی افزایش می‌یابد. این عامل بر روی بهره‌وری سامانه اثرگذار بوده و آب گرم درون سامانه در هنگام نبود خورشید (بعد از غروب خورشید) می‌تواند برای اهداف گرمایشی به‌خصوص در محل‌های سرد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ضریب انتقال حرارت به‌صورت کلی از ۱۰/۴ به $W.m^{-2}.K^{-1}$ ۲/۶ افت پیدا کرده و عملکرد سامانه بهبود پیدا کرد (Abu-Arabi *et al.*, 2018).

همان‌گونه که اشاره شد، یکی دیگر از کاربردهای جمع‌کننده‌های سهموی در آب شیرین‌کن‌ها می‌باشد. در این سامانه‌ها نیز از PCM استفاده گردیده است تا بتوان راندمان حرارتی و به تبع آن آب تولیدی را افزایش داد. به عبارت دیگر به دلیل تعادل بین گرماگیری و گرمادهی سامانه کارایی بهبود یافت. علاوه بر آن سطح اشغال‌شده و مصرف انرژی زیاد (Duong, Cooper, Nelemans, Cath, & Nghiem, 2015) و بالا بودن دوره بازگشت سرمایه از نظر اقتصادی از ایرادات آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است (Reif & Alhalabi, 2015). نتایج پژوهشی که در آب‌شیرین‌کن از PCM استفاده شده بود، نشان داد که این مواد سبب افزایش بهره‌وری تجمعی و افزایش ساعات کار سامانه می‌گردد. میزان بهره‌وری تجمعی در انتهای روز ۶/۳ لیتر و بیشترین مقدار بهره‌وری در ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ مشاهده گردید (Rehman, Shakir, Razaq, Saqib, & Tahir, 2018). علاوه بر آن در برخی موارد به مواد تغییرفازدهنده نانو ذراتی اضافه می‌گردد که باعث می‌گردد فرآیند ذخیره‌سازی بهبود یابد. در مطالعه‌ای دیگر، تغییرات بازده حرارتی در یک جمع‌کننده سهموی همراه با لوله تخلیه‌شده حاوی نانو PCM و باله‌ها، مورد بررسی قرار

1- Phase change materials

گرفت. همچنین اثر افزودن نانوذرات مس به موم پارافین بر عملکرد سامانه مورد بررسی قرار گرفت. انتقال حرارت در طی فرآیند ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار Ansys-Fluent شبیه‌سازی شده و داده‌های خروجی به‌صورت کانتورهای حرارتی ترسیم شدند. ویژگی‌های تغییر فاز جامد- مایع پارافین در سامانه و بهینه‌سازی پارامترهای باله (ضخامت باله و فاصله باله‌ها) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن باله‌ها تأثیر زیادی بر انتقال حرارت و تغییر فاز پارافین در سامانه داشت. همچنین اشاره شد که PCM با نازک‌تر شدن ضخامت باله‌ها سریع‌تر ذوب می‌شود. افزودن ۱ درصد مس به PCM، غلظت جرمی بهینه‌ای است که در آن دمای خروجی سیال کاری به میزان ۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد (Elarem *et al.*, 2021).

همان‌طور که اشاره شد در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی برای گرفتن انرژی حرارتی از خورشید از جمع‌کننده‌های مختلفی استفاده می‌گردد. یکی از رایج‌ترین جمع‌کننده‌ها، نوع سهموی می‌باشد. این جمع‌کننده‌ها به دلیل طراحی آسان، بازده نسبتا مناسب، قیمت مناسب و سطح اشغال کمتر، بیشتر مورد توجه بوده و محققان سعی در بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها دارند (Motevali, 2013). تاکنون فناوری‌های زیادی برای بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از انواع نانوسیال‌ها، تعقیب‌کننده‌های خورشیدی دقیق، لوله تحت خلا به‌عنوان دریافت‌کننده و منعکس‌کننده ثانویه اشاره نمود. یکی از منابع اتلاف انرژی در جمع‌کننده‌های سهموی شکل مربوط به لوله دریافت‌کننده است. مقداری از انرژی خورشیدی که به خط کانونی جمع‌کننده منعکس می‌شود، به علت خصوصیات ناسازگار سیال‌کاری، از لوله گیرنده تلف‌شده و از دسترس خارج می‌شود. استفاده از سیال مناسب با ماده تغییرفازدهنده مناسب یک روش کارآمد برای رفع مشکل ذکر شده است. یکی دیگر از عواملی که می‌تواند باعث بهبود کارایی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی گردد، استفاده از سامانه تعقیب‌کننده دقیق و منطبق بر حداکثر تابش خورشیدی است. در پژوهشی تاثیر سامانه تعقیب‌کننده بر روی جمع‌کننده سهموی به‌صورت تجربی بررسی شد. نتایج نشان داد میزان انرژی دریافت‌شده از خورشید به میزان ۴۶/۴۶٪ با استفاده از سامانه ردیاب خورشیدی دو محوره افزایش می‌یابد (Bakos, 2006). در مطالعه‌ای اثر شکل جمع‌کننده بر بازده حرارتی آن به‌ویژه برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی بررسی شد. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند، که جمع‌کننده‌های سهموی به دلیل قالب نه‌چندان پیچیده، بالا بودن بازده و همچنین مقرون به‌صرفه بودن نسبت به جمع‌کننده‌های دیگر بسیار موثر و مفید هستند (Abdessemed, Bougriou, Guerraiche, & Abachi, 2018).

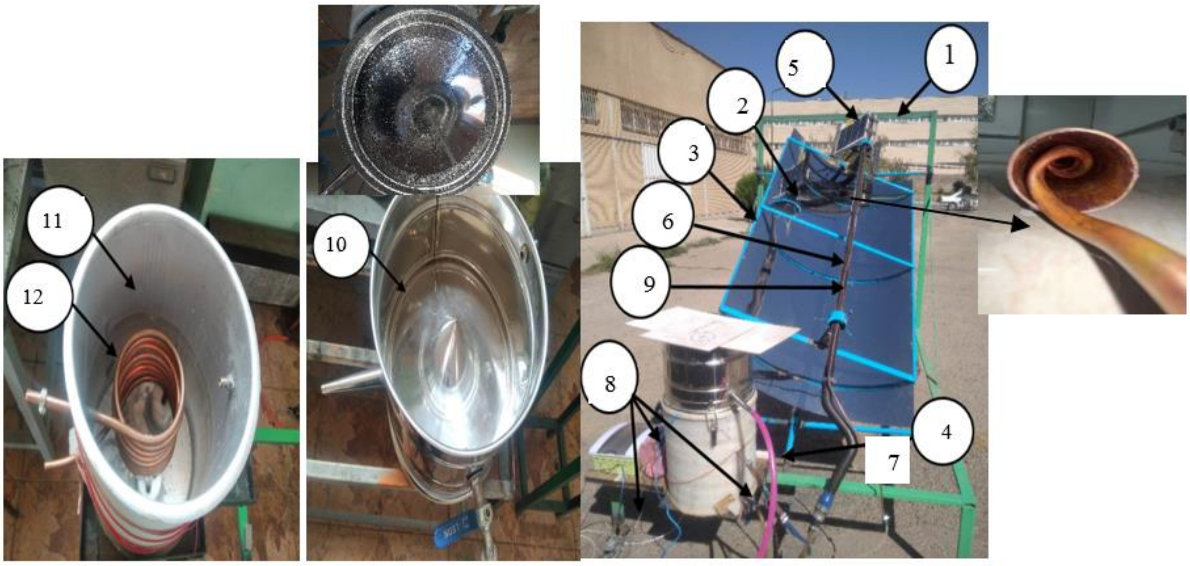
علاوه بر آن پژوهش‌هایی نیز در زمینه تاثیر استفاده از سیال‌کاری مختلف بر عملکرد جمع‌کننده خورشیدی سهموی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که انرژی حرارتی ورودی به سامانه برای نانوسیال، روغن، گلیسرین و آب به‌عنوان سیال کاری در سامانه به‌ترتیب حدود ۱۷/۳۶ MJ، ۱۸/۴۶ MJ، ۱۷/۷۶ MJ و ۱۶/۸۰ MJ بود. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی به روش CFD نشان داد که روش CFD می‌تواند عملکرد سامانه را با سیالات‌کاری مختلف با دقت خوبی پیش‌بینی کند (Alimohammadi, Samimi Akhijahani, & Salami, 2020). استفاده از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی (مخزن، سیال و مواد تغییرفازدهنده) با افزایش تابش خورشیدی در روزهای آزمایش، اثر دیگری است که می‌تواند میزان ذخیره انرژی افزایش دهد. برخی از مواد (مایع یا سیال+ جامد) مانند روغن هیدرولیک، $CEO_2$/ آب، $Al_2O_3$/ نانو سیال روغن مصنوعی، Cu، $Al_2O_3$/روغن، $TiO_2$ و $Fe_3O_4$–آب به‌عنوان سیال‌های کاری می‌باشند که در جمع‌کننده‌های خورشیدی استفاده می‌شوند و از بین موارد ذکرشده سیالی که افزایش عملکرد جمع‌کننده می‌شود، آب است. در یک آزمایش که جهت مقایسه عملکرد سامانه با استفاده از سیال‌کاری بررسی شد، نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز راندمان با استفاده از روش CFD نشان‌دهنده آن بودکه به‌کارگیری آب به‌عنوان سیال‌کاری، تلفات کمتری در دماهای بالای دارد (Kumar, Vijayan, & Baskar, 2016).

همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شد، سامانه‌های آب‌شیرین‌کن مشکلاتی از قبیل اقتصادی نبودن سامانه، پیچیدگی‌های بیش‌از حد، عدم دسترسی به منابع انرژی، بازده کم، بزرگ بودن سامانه و اشغال فضای زیاد می‌باشند. این موارد باعث می‌گردد، تمایل به استفاده از سامانه‌های خورشیدی کاهش یابد. در تحقیق حاضر برای افزایش کارایی سامانه از یک لوله مارپیچ حاوی مواد تغییرفازدهنده درون لوله دریافت‌کننده استفاده شد. به عبارت دیگر حالت مارپیچ و مواد تغییرفازدهنده به‌طور همزمان باعث متعادل نمودن گرماگیری و گرمادهی در لوله شده و راندمان را تا حد قابل‌قبول بهبود دهد. به دلیل حذف ناهماهنگی‌های جذب و آزادسازی و حفظ تعادل حرارتی سامانه عملکرد سامانه بهبود پیدا می‌کند. علاوه بر آن برای دنبال کردن تشعشات خورشیدی به‌طور دقیق از یک سامانه تعقیب‌کننده خورشیدی که شامل سلول‌های خورشیدی کوچک هستند استفاده می‌گردد. در این حالت نیز به دلیل استفاده بهینه از تشعشع خورشیدی بازده حرارتی سامانه بهبود خواهد یافت. با توجه به تحقیقات پیشین چنین مطالعه‌ای با لحاظ نمودن سامانه آب‌شیرین‌کن قبلا انجام نگرفته است.

## مواد و روش‌ها

### شرح دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و متعلقات آن

سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در مقیاس آزمایشگاهی در دانشگاه کردستان طراحی و ساخته شده و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آن انجام گرفت. اجزای دستگاه عبارتند از: ۱- پایه دستگاه، ۲- منعکس‌کننده سهموی خطی، ۳- قاب آهنی، ۴- پمپ DC جهت ایجاد جریان آب در لوله گیرنده، ۵- تعقیب‌کننده خورشیدی، ۶- لوله جاذب، ۷- مجاری انتقال سیال، ۸- حسگرها، ۹- لوله حاوی PCM، ۱۰- واحد سردساز، ۱۱- مخزن سیال، ۱۲- لوله مارپیچ درون مخزن می‌باشد. منعکس‌کننده سهموی خطی دارای یک ورقه استیل با دهانه سهموی می‌باشد که در طول جمع‌کننده امتداد یافته است و از یک محافظ آهنی به‌عنوان قابی برای منعکس‌کننده در نظر گرفته شد. سامانه مورد نظر از یک جمع‌کننده سهموی با پایه‌های فلزی و موتور محرک و سامانه ردیاب خورشیدی ساخته شده است. اجزای اصلی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است.




**شکل ۱**- اجزای اصلی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مورد استفاده در پژوهش شامل: ۱- پایه دستگاه، ۲- منعکس‌کننده سهموی خطی، ۳- قاب آهنی، ۴- پمپ DC، ۵- ردیاب خورشیدی، ۶- لوله جاذب، ۷- مجاری انتقال سیال، ۸- حسگرها، ۹- لوله حاوی PCM، ۱۰- واحد سردکننده، ۱۱- مخزن سیال و ۱۲- لوله مارپیچ درون مخزن

**Fig.1.** The main components of the solar water desalination system are: 1- Chassis, 2- Linear parabolic reflector, 3- Steel frame, 4- DC pump, 5- Solar tracker, 6- Absorber tube, 7- Fluid transfer tubes, 8- Sensors, 9- Copper tube containing PCM, 10- Cooling unit, 11- Fluid tank, and 12- Spiral pipe inside the tank

### دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و متعلقات آن

اجزای مختلف سامانه آب‌شیرین‌کن همراه با متعلقات و جزئیات آن شامل نوع، جنس، اندازه و ویژگی هر جزء در جدول۱ لیست شده است. ابتدا اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سامانه آب‌شیرین‌کن و سپس زیر مجموعه هر عنصر با جزئیات توضیح داده می‌شود. کار اصلی جمع‌کننده، جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به انرژی گرمایی و انتقال آن به سیال عامل است که مهم‌ترین بخش هر آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. از ورق استیل براق ضدزنگ صیقل، به‌عنوان بازتاباننده (آینه) جمع‌کننده سهموی استفاده شد. قابل ذکر است که جمع‌کننده سهموی یک آینه سهموی شکل است که در کانون آن یک لوله جاذب قرار دارد. نور خورشید با استفاده از آینه بر روی لوله دریافت‌کننده متمرکز شده و به سیال عامل انتقال می‌یابد.

در این مطالعه هدف ذخیره کردن انرژی بوده و در عین حال سعی بر آن است که دمای درون مخزن ذخیره‌کننده بین ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس باشد. در نتیجه از آب به‌عنوان سیال ذخیره‌کننده و انتقال‌دهنده انرژی در سامانه استفاده شد. لوله جاذب جمع‌کننده‌ی سهموی برای جذب حداکثری و انتشار حداقل انرژی خورشیدی به رنگ سیاه مات پوشش داده شد. در درون لوله جاذب، لوله مسی با گام ۷ سانتی‌متر حاوی PCM قرار داده شد. ظرفیت مخزن آب شور که برای عمل تقطیر استفاده شد، ۷ لیتر بود. برای توزیع مناسب گرما درون مخزن تقطیر و امکان تقطیر حداکثری از سنگریزه‌ها استفاده گردید. در این حالت با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه آب ($J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ۴/۱۹۲) که مقدار آن از ظرفیت گرمایی ویژه سنگریزه ($J.\ g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ۰/۷۸۲) بیشتر است، امکان گرمایش سامانه در مدت زمان کم به دلیل افزایش مساحت درگیر با سیال افزایش پیدا می‌کند (Nasri, Benatiallah, Kalloum, & Benatiallah, 2019).

**جدول ۱**- جزئیات جمع‌کننده سهموی و سامانه آب‌شیرین‌کن

**Table 1-** Components details of the solar collector and desalination system

| سیستم اصلی **Primary system** | اجزا **Parts** | جزئیات اجزا **Part details** |
|---|---|---|
| Solar collector | Parabolic trough collector | Reflector: Stainless steel (Area: 1500×900 $mm^2$, thickness: 1 mm) with the reflection coefficient of 0.91, absorption coefficient of 0.1, and concentration factor of 25. The inclination angle was 45º north-south. |
| | Receiving element | A 30 mm copper tube, 1mm thickness |
| Desalination system | Tank | An Aluminum tank, with diameter of 300 mm and height of 500 mm, covered by glass wool with thickness of 40 mm (for insulation) |
| | Spiral PCM tube | A copper tube with 1 mm thickness, 6 turns, and 10 mm pitch, placed in the middle of the tank and 100mm from the bottom. |
| | Working fluid | Nanofluid (Water + $Al_2O_3$, 3.75%) |
| | Fluid pump | DC 12-volt, Max. 10 Ampere, 5.9 l/min, Model (NM, 32-60-180) |
| | Distillation system | 0.5 mm thick steel, with a conical water collector, and capacity of 10 liters. |
| Tracking mechanism | Electromotor | A DC electromotor, 12 V, 40 rpm, Model: JSX69-370, China. |
| | Gearbox | A 1:80 Gearbox, Model: 2363-75-China |
| | Detectors | Two 10 Watt PV, Monocrystal, RT010-M, Restar solar Co, China |
| | Controlling circuit | An Arduino, UNO R3 (connected to a laptop) |
| | PV Panel | 10W, YL 10C-18b, Module efficiency: 17.4%, Current at $P_{max}$: 0.56A |

در مرکز مخزن یک لوله فنری تعبیه شده است و برای ورود و خروج این لوله فنری مارپیچی، دو دریچه بر روی بدنه مخزن قرار گرفته است. برای جلوگیری از تلفات حرارتی، اطراف مخزن با عایق به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از جنس فوم پوشش داده شد. در ورودی جمع‌کننده یک پمپ سیال ۱۲ ولت دی سی قرار گرفته است. برای تهیه آب شور، با توجه به این‌که درصد نمک آب شور دریا ۱۵ گرم در هزار است، به میزان ۱۵ گرم نمک بلورین (نمک دریا) در یک لیتر آب شرب معمولی حل گردیده و به مقدار مورد نیاز در سامانه قرار داده شد.

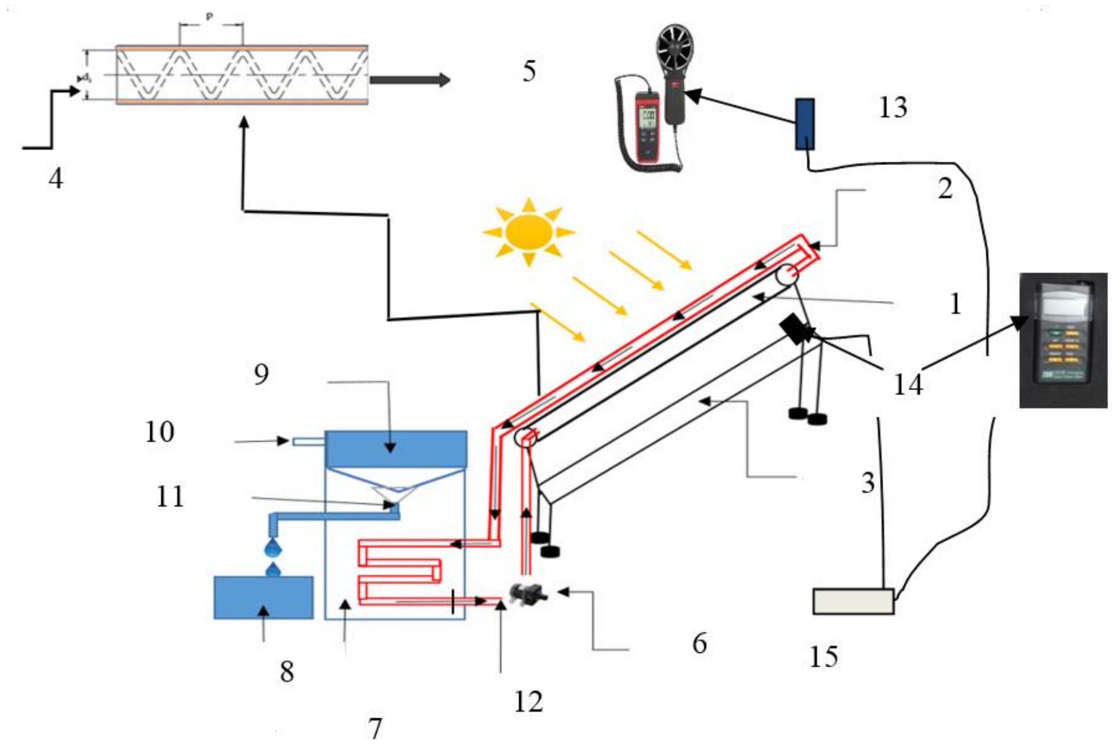
## توضیح روند کارکرد سامانه

مهم‌ترین قسمت یک سامانه حرارتی خورشیدی، جمع‌کننده آن می‌باشد و در جمع‌کننده سهموی لوله دریافت‌کننده (۱) نقش مهمی در بازده حرارتی جمع‌کننده دارد. استفاده از بخش ذخیره‌کننده‌ی انرژی باعث می‌گردد که انرژی حرارتی در ساعات اوج تابش در آن ذخیره شده و در هنگام کاهش تابش خورشیدی آزاد گردد. هندسه سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. سیال جریان یافته (۴) در درون لوله مارپیچ داخل مخزن به‌وسیله پمپ به داخل لوله‌ی جاذب جمع‌کننده سهموی وارد می‌شود. همان‌طور که اشاره شد درون لوله جاذب یا لوله دریافت‌کننده، یک لوله مسی مارپیچ با گام ۷ سانتی‌متر قرار دارد، که حاوی پارافین است.

با تابش نور خورشید، آینه سهموی (۳) تابش خورشید را روی لوله دریافت‌کننده منعکس کرده و باعث گرم شدن آب درون لوله جاذب می‌گردد. بخشی از این انرژی حرارتی توسط لوله PCM که در درون لوله جاذب قرار گرفته، جذب شده و بخش دیگر باعث گرم شدن سیال‌کاری جریان یافته از لوله جاذب می‌گردد. آب گرم‌شده به‌وسیله پمپ (۶) از طریق مجاری جریان سیال (۲) به درون لوله مارپیچ داخل مخزن (۷) می‌رود و سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می‌شود و سپس آب از طریق خروجی لوله مارپیچ به درون لوله جاذب جریان پیدا می‌کند. در واقع مسیر جریان سیال‌کاری (آب) یک فرآیند بسته است که سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می‌شود.

فرآیند سردسازی با استفاده از یک منبع (۹) که در قسمت فوقانی مخزن تقطیر (۷) قرار گرفته انجام می‌شود. در این حالت قطرات بخار درون مخزن به سطح زیرین مخزن سردساز (که به‌صورت یک قیف معکوس است) برخورد کرده و عمل میعان صورت می‌گیرد. قطرات ایجادشده در واحد سردساز با توجه به هندسه شیبدار، به سمت نوک قیف (۱۱) حرکت نموده و از لوله خروجی به شیشه آب (۸) انتقال داده می‌شود. آب گرم خارج‌شده (۱۰) از قسمت سردساز می‌تواند به‌عنوان ورودی مخزن که پیش‌گرمایش در آن انجام شده مورد استفاده در سامانه قرار گیرد. فرآیند شیرین‌سازی آب شور در سامانه آن‌قدر ادامه می‌یابد تا بتوان به میزان آب شیرین تولیدی قابل‌توجه درون سامانه دست پیدا کرد. قابل ذکر است به دلیل استفاده از PCM در سامانه

خورشیدی در هنگام نبود تابش خورشید نیز می‌توان از سامانه استفاده کرد و همین امر سبب افزایش بازده سامانه می‌گردد. شماتیک اجـزای اشاره‌شده به همراه بادسـنج (۱۳) و پیرانـومتر (۱۴) و ثبت‌کننـده داده (۱۶) در شکل ۲ نمایش داده شده است.




**شکل ۲**- شماتیک سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی همراه با جزئیات شامل: ۱- لوله جاذب، ۲- خروجی سیال، ۳- منعکس‌کننده، ۴-ورودی سیال کاری، ۵- خروجی سیال کاری، ۶- پمپ، ۷- مخزن آب شور، ۸- آب شیرین، ۹- واحد سردساز ، ۱۰- ورودی آب سرد، ۱۱- جریان بخار، ۱۲- ورودی سیال کاری به پمپ، ۱۳- بادسنج، ۱۴- پیرانومتر و ۱۵- دیتالاگر

**Fig.2.** Schematic of solar desalination: 1- Absorber tube, 2- Fluid outlet, 3- Reflector, 4- Working fluid inlet, 5- Working fluid outlet, 6- Pump, 7- Salt water tank, 8- Outlet drinkable water, 9- Chiller unit, 10-Cold water inlet, 11- Steam flow, 12-Working fluid inlet to the pump, 13-Anemometer, 14-pyranometer, and 15-Datalogger

### مـاده تغییرفازدهنـده و نحـوه قرارگیـری آن درون لولـه مارپیچ

تغییرفازدهنده‌ی به‌کارگرفته در این آزمایش پارافین وکس ساخت شرکت ایران پارافین به مقدار ۱۷۱ گرم می‌باشد. مواد تغییرفازدهنـده، که تغییر فاز آن‌ها حالت جامد به مایع است، بیشـترین اسـتفاده را در مقایسه با دیگر PCM ها دارند. زیرا در یک بازه کوتاه زمـانی، مقـدار انرژی حرارتی زیادی ذخیره می‌کنـد. در ایـن تحقیـق نیـز بـه دلیـل خواص منحصر به‌فرد نظیر عدم فساد، نقطه ذوب پایین، ضریب انتقال حرارت، ظرفیـت گرمـای ویـژه بـالا و در دسـترس بـودن از پـارافین استفاده گردید. پارافین RT50 درون لوله مسی با قطر ۶ میلی‌متر و با ضخامت ۰/۶ میلی‌متر با گام ۷۰ میلی‌متـر در طـول ۲۰۰۰ میلـی‌متـر ریخته شده و سپس داخل دریافت‌کننده مرکزی قرار گرفـت. خـواص ترمو-فیزیکی پارافین در جدول ۲ ارائه شده است.

### سامانه تعقیب‌کننده تابش خورشیدی پنلی

اسـتفاده از سـامانه تعقیب‌کننـده خورشـیدی مناسـب، یکـی از روش‌هـای مهـم در افـزایش رانـدمان دسـتگاه‌هـای آب‌شـیرین‌کـن خورشیدی است. ایـن سـامانه دارای دو عـدد پنـل خورشـیدی مـدل RT010M است که با زاویه ۴۵ درجه در قسمت بـالای لولـه جـاذب جمع‌کننده سهموی قرار گرفته است. با تغییر زاویه تـابش خورشـید در طول ساعات روز، سامانه تعقیب‌کننده خورشید جمع‌کننده را ملـزم بـه تغییر زاویه به موازات خورشـید مـی‌کنـد. در طـول روز، زاویـه تـابش خورشید باید بر سطح جمع‌کننده عمود قرار گیرد تا بیشـترین رانـدمان سامانه به‌دست آید. در سامانه تعقیـب‌کننـده، جریـان عبـوری از پنـل خورشیدی به برد آردوینو-36Lenovo Z500 انتقال و سپس به موتور محرک جمع‌کننده فرمان داده و به‌ازای هر بارکه پنل‌ها تابش خورشید را حس می‌کنـد و اخـتلاف بـین دو خروجـی پنـل بـه‌وجود مـی‌آیـد،

الکتروموتور قرار داده شده بر روی محور جمع‌کننده سهموی فعال شده و جمع‌کننده را در جهت تابش خورشید تغییر مکان می‌دهد. با استفاده از یک الکتروموتور جریان مستقیم ۱۲ ولت گیربکس‌دار محور جمع‌کننده به‌کار می‌افتد.

**جدول ۲**– خواص پارافین واکس مورد استفاده به‌عنوان PCM داخل جمع‌کننده
**Table 2-** Properties of paraffin wax used as PCM inside the collector

| ویژگی Property | دمای حالت مایع Liquid temperature (K) | چگالی Density ($kg.m^{-3}$) | ضریب انبساط حجمی Volumetric expansion coefficient ($1.K^{-1}$) | گرمای نهان Latent heat ($kJ.kg^{-1}$) | هدایت حرارتی Thermal conductivity ($W.m^{-1} K^{-1}$) | گرمای ویژه Specific heat ($kJ.kg^{-1} K^{-1}$) | دمای حالت جامد Solid temperature (K) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقدار Value | 325 | 783 | 0.000561 | 166 | 0.2 | 2.1 | 317.3 |

## حس‌گرها و ابزارهای اندازه‌گیری

به‌منظور ثبت دما در نقاط مختلف سامانه از ترموکوپل‌های نوع K استفاده شد. یکی از ترموکوپل‌ها در داخل مخزن آب شور و دیگری بر روی مبدل مارپیچ قرار داده شد. هم چنین دو حس‌گر دما در خروجی و ورودی جمع‌کننده و یک حس‌گر برای ثبت دمای محیط، در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوای محیط از بادسنج (UNI-T-363, China) با دقت $0/1\ m.s^{-1}$ استفاده شد. برای سنجش رطوبت محیط از رطوبت‌سنج (HT, 3600, Lutron, Taiwan) با دقت ۱٪ استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از پیرانومتر دیجیتالی (TES 1333R, CMP6, Taiwan) با دقت $1\ W.m^{-2}$ استفاده شد. در طی چهار روز آزمایش، آب خروجی از آزمایش در صبح روز بعد به‌وسیله ترازوی دیجیتال AND مدل FX-3000GD به ظرفیت ۱۵۰۰ گرم با دقت ۰/۰۱ گرم، وزن می‌شد.

## داده‌های محیطی

تغییرات شدت تابش خورشید به سطح جمع‌کننده در روزهای آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. متوسط تابش خورشیدی در روزهای آزمایش از ساعت ۱۰:۰۰ افزایش یافته و در حدود ساعت ۱۳:۰۰ تا ۱۳:۳۰ به حداکثر میزان خود (۹۸۰ وات بر مترمربع) می‌رسد. پس از آن روند کاهشی به خود می‌گیرد. با توجه به تغییرات نمودار شدت تابش خورشیدی مشخص می‌شود که زمان مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی باید زمانی در نظر گرفته شود که شدت تابش خورشید بیشینه است. این حالت می‌تواند از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که در روزهای آزمایش شرایط محیطی مناسب و آسمان صاف بود.

میانگین تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی در طول روزهای آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. دمای هوا با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که مقداری از انرژی حرارتی دریافتی در جو زمین به گرما تبدیل می‌شود. این امر توسط پدیده‌های محیطی از جمله ذرات خاک و مولکول‌های هوا رخ می‌دهد و باعث افزایش دمای هوا می‌شود. با افزایش میزان گرد و خاک و آلاینده‌های محیطی این افزایش دما بیشتر خواهد بود (Rehman & Mohandes, 2008). اما با افزایش شدت تابش خورشیدی، در اثر تبخیر مولکول‌های آب (بین مولکول‌های هوا) رطوبت نسبی (RH) به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (Rehman & Mohandes, 2008). همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، دمای هوای محیطی از ۲۳/۳ به ۳۲/۳ درجه سلسیوس و RH از ۲۰/۲ درصد تا ۱۳ درصد تغییر می‌کند. علاوه بر آن میزان تغییرات سرعت باد محیط بین ۰/۱ تا ۱/۲ متر بر ثانیه متغیر است و این تغییرات در طول روزهای آزمایش محسوس نبوده است.

## محاسبات نظری: عملکرد حرارتی جمع‌کننده با سامانه ذخیره‌ساز انرژی

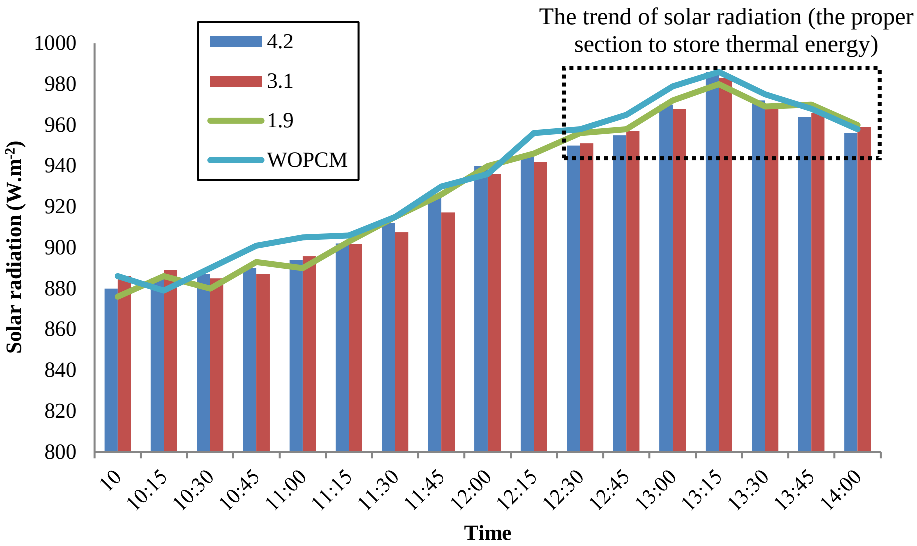
بخش عمده انرژی خورشیدی دریافتی از جمع‌کننده، تلف‌شده و انرژی باقی‌مانده به‌صورت انرژی گرمایی مفید می‌تواند با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شود:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R \left( \left[ I_o (\tau\alpha) \right] - U_L (T_i - T_o) \right) \quad (۱)$$

($\tau\alpha$) فاکتور جذب انرژی خورشیدی است.

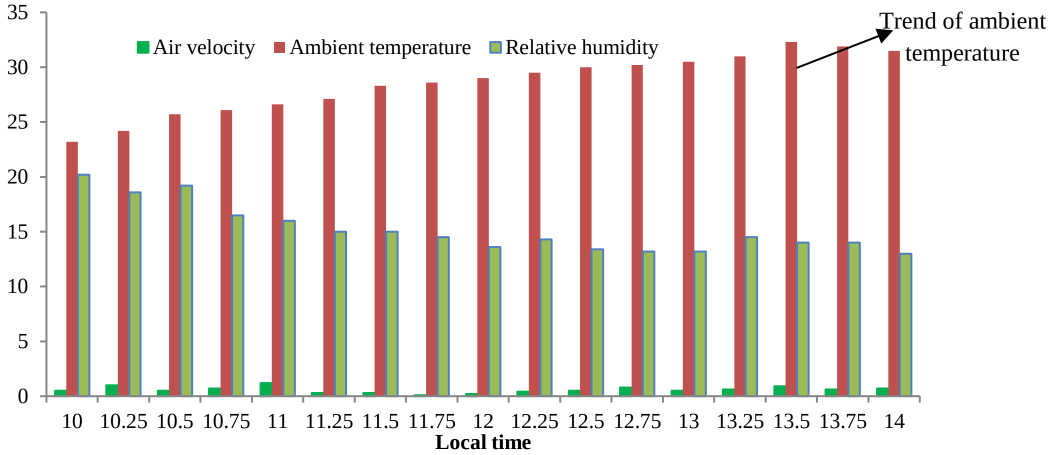
بازده گرمایی جمع‌کننده مطابق با ASHRAE standard 2003 با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید (Eltawil, Mostafa, Azam, & Alghannam, 2018):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_C I_o} = \frac{\dot{m} c_p (T_{oi} - T)}{A_C I_o} \quad (۲)$$




**شکل ۳**- تغییرات شدت تابش خورشیدی در طول زمان آزمایش

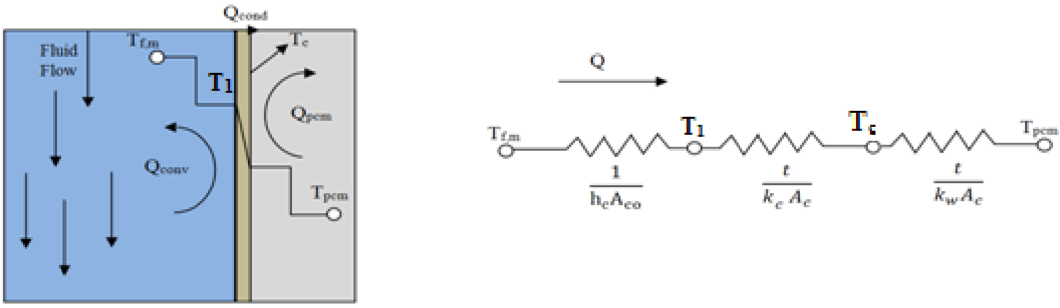
**Fig.3.** Changes in solar radiation intensity during the test time




**شکل ٤**- روند تغییرات دما، رطوبت و سرعت هوای محیط در طول ساعات داده‌گیری

**Fig.4.** Changes in temperature, humidity, and ambient air velocity during the hours of data collection

سیستم ذخیره‌سازی شامل لوله مسی است که داخل لوله دریافت‌کننده قرار گرفته و با موم پارافین پر شده است. در جریان ذخیره‌سازی انرژی (شارژ)، زمانی که شدت تابش در سطح بالایی قرار دارد، سیال گرم شده و پارافین به حالت جامد در داخل لوله مارپیچ از طریق جذب گرما از سیال، به حالت مایع تغییر می‌یابد. هنگامی که شدت تابش خورشیدی در سطح پایینی است، دمای سیال داخل جمع‌کننده کمتر از دمای محیط است. بنابراین تغییر فاز بالعکس شده و پارافین انرژی گرمایی را به سیال جریان یافته در در داخل لوله جمع‌کننده و محفظه تقطیرکننده منتقل می‌نماید. انرژی جذب‌شده توسط واحد PCM، مشتمل بر دو بخش اصلی است: پارافین و لوله‌های مسی به‌عنوان پوشش. مدار گرمایی جمع‌کننده سهموی، شامل سیال، دیواره و PCM که به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی به‌کار گرفته شده است و عملکرد گرمایی جمع‌کننده می‌باشد. شکل ۳ انرژی گرمایی جذب‌شده، که از سیال به دیواره مسی، از طریق همرفت منتقل شده و سپس از دیواره به پارافین هدایت شده است، را نشان می‌دهد (Esakkimuthu *et al.*, 2013). در این حالت دمای پارافین (PCM) افزایش یافته و در نتیجه فاز PCM در نقطه ذوب تغییر می‌کند (شکل ۵).




**شکل ۵**- مدار انتقال حرارت برای سیال، لوله مسی و پارافین به‌عنوان ماده PCM

**Fig.5.** Heat transfer circuit for fluid, copper tube, and paraffin as PCM material

میزان انرژی گرمایی منتقل‌شده از جمع‌کننده به سیال، می‌تواند با در نظر گرفتن دمای ورودی ($T_{f.in}$) و خروجی ($T_{f.out}$) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شود (Serale, Goia, & Perino, 2016):

$$\dot{Q}_f = \dot{m} c_p (T_{f,in} - T_{f,out}) \qquad (۳)$$

شار گرمایی همرفتی از سیال با دمای بالاتر به پوشش دیواره PCM ($Q_{conv}$) به میانگین دمای سیال ($T_{f,m}$) و دمای پوشش ($T_{c,m}$) بستگی دارد:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_{co} (T_{f,m} - T_{c,m}) \qquad (۴)$$

که در آن $h_c$ به کمک رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$h_c = \frac{k}{d} Nu \qquad (۵)$$

اعداد ناسلت، رینولدز، پرانتل جهت محاسبه ضریب انتقال گرما در جمع‌کننده لازم و ضروری هستند. Nu عدد ناسلت می‌باشد که مقدار آن برای این تحقیق با استفاده از رابطه (۶) قابل‌محاسبه است.

$$Nu = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، Re و Pr به‌ترتیب عدد رینولدز و عدد پرانتل هستند. این اعداد با استفاده از رابطه (۷) و (۸) بیان می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \qquad (۷)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \qquad (۸)$$

انتقال گرمایی که به پارافین داخل لوله مسی منتقل شده است، از رابطه (۹) قابل‌محاسبه است (Koca, Oztopb, Koyunc, & Varol, 2008):

$$\dot{Q}_{cond} = k_w A_{co} \frac{(T_{c,m} - T_{pcm})}{t_c} \qquad (۹)$$

با توجه به تغییر فاز در PCM، فرآیند ذخیره‌سازی و تخلیه رخ می‌دهد، انرژی مبادله‌پذیر کل با روابط ارائه‌شده در منبع (Goyal, Tiwari, & Garg, 1998) تعریف می‌شود.

## بازده انرژی

نسبت انرژی مصرف‌شده برای تقطیر آب درون مخزن به کل انرژی مصرف‌شده سامانه آب‌شیرین‌کن در طول مسیر فرآیند شیرین‌سازی را نسبت انرژی مصرفی می‌گویند. انرژی مصرفی برای تبخیر آب از رابطه (۱۰) قابل‌محاسبه است (El-Morad, Maghawry, & Wasfy, 2017).

$$Q_w = h_{fg} \cdot m_{w,ev} \quad , \quad h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 (T - 273.16) \qquad (۱۰)$$

که در آن $m_{w,ev}$ آب تبخیری (kg) و $h_{fg}$ گرمای نهان تبخیر در هنگام تصفیه شدن آب دمای نمک‌زدایی بر حسب کلوین ($kJ.kg^{-1}$) می‌باشد.

بر این اساس بازده انرژی جمع‌کننده طبق استاندارد ASHRAE 2003 از رابطه (۱۱) قابل‌محاسبه خواهد بود:

$$\eta' = \frac{Q_w}{A_c I_o} \qquad (۱۱)$$

مقدار انرژی لازم برای گرم کردن و تبخیر آب و انرژی کل (الکتریکی و گرمایی) ورودی به گرمکن، برای تعیین بازدهی تبخیر آب، رابطه (۱۲) لحاظ می‌گردد (Mousa & Abu Arabi, 2012).

$$\eta_{des} = \frac{Q_w}{Q_f + E_{elc}} \qquad (۱۲)$$

عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی با پارامتر مصرف انرژی ویژه (SEC) محاسبه می‌گردد. SEC به‌صورت انرژی لازم برای تبخیر کردن یک کیلوگرم از آب تعریف می‌شود که به‌صورت رابطه (۱۳) مشخص می‌شود.

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \qquad (۱۳)$$

## تاریخ و محل انجام آزمایش

این پژوهش طی چهار آزمایش مجزا در ۴ روز متوالی ۲، ۳، ۴ و ۵ شهریور ماه، سال ۱۴۰۱ برای سه دبی حجمی سیال ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده در آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه کردستان در شهر سنندج انجام شد. آزمایشات در شرایط مشابه و از ساعت ۱۰:۰۰ آغاز و در ساعت ۱۴:۰۰

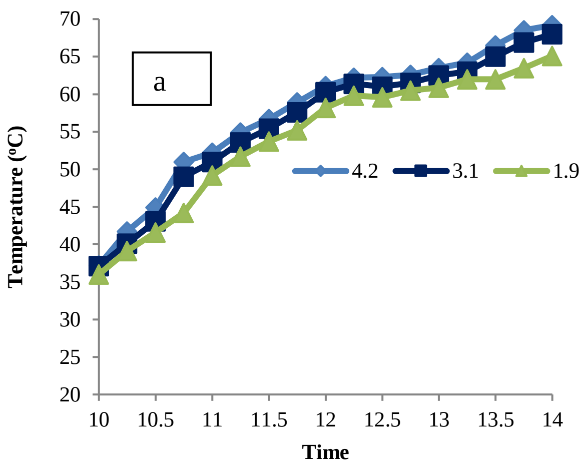
پایان یافته‌اند. لازم به ذکر است که در حالت بدون مواد تغییرفازدهنده دبی حجمی سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در این حالت پمپ در حداکثر دبی خود انتقال سیال را انجام می‌داد.

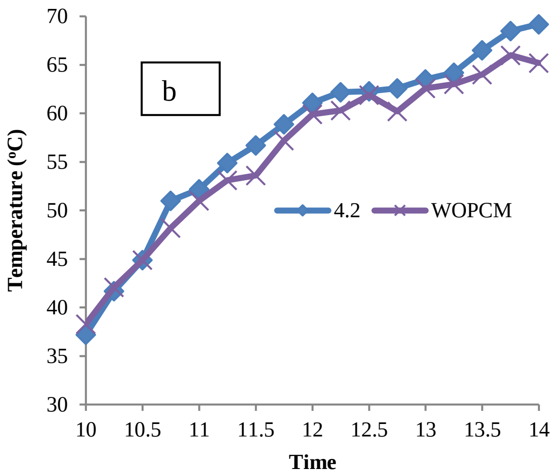
## نتایج و بحث

### تغییرات حرارت در سامانه

در شکل ۶-الف دمای سیال در مخزن تقطیر با سه حالت از جریان سیال در داخل سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی نشان داده شده است. برای همه شرایط، مواد تغییرفاز در درون لوله جاذب حرارت قرار دارد. با توجه به شکل مشخص است که برای انواع جریان سیال، دمای سیال با تغییر شدت تابش تغییر می‌کند و نرخ گرمایش با افزایش و کاهش تابش به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. با توجه به متغیر بودن سرعت جریان سیال در سامانه، میزان افزایش و کاهش دمای سیال متفاوت بوده است. در این تحقیق همان‌طور که اشاره شد از آب به‌عنوان سیال‌کاری (به دلیل ظرفیت گرمای بیشتر) استفاده گردید. لازم به ذکر است، سامانه حداقل به مدت یک ساعت قبل از شروع آزمایش و داده‌گیری در مقابل شرایط محیطی قرار داده می‌شد. در ساعات شروع داده‌برداری قسمتی از انرژی واردشده به لوله دریافت‌کننده صرف گرم کردن مواد تغییرفازدهنده و لوله ماریپچ درون دریافت‌کننده شده و دمای ابتدایی سامانه را کاهش می‌دهد. بیشترین دمای آب شور برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن برای دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه اتفاق می‌افتد. با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه، گرمای جذب‌شده توسط لوله جاذب سریعا به‌وسیله سیال به محفظه آب شور انتقال می‌یابد. بنابراین از افت حرارت در سامانه جلوگیری نموده و دمای آب شور افزایش می‌یابد. این در حالی است که با دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه به دلیل سرعت کم، سیال کاری به کندی در سامانه جریان یافته و گرمای ورودی به میزان محدودی به آب شور انتقال داده می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش دبی جریان سیال گرمای بیشتری از جمع‌کننده خارج می‌شود (Goudarzi, Shojaeizadeh, & Nejati, 2014).

علاوه بر آن در شکل ۶-ب تغییرات دمای آب شور برای حالت با و بدون مواد تغییرفازدهنده در سامانه با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه نمایش داده شده است. با توجه نمودارها، مشخص است که در حالت بدون مواد تغییرفازدهنده، دمای آب شور دارای نوسانات زیادی نسبت به حالت با مواد تغییرفازدهنده است. در این حالت نوسانات حرارتی به‌وجودآمده از تابش خورشیدی به‌وسیله لوله ماریپچ حاوی مواد تغییرفازدهنده جذب و یا آزاد شده بنابراین حرارت تولیدی متعادل می‌شود. علاوه بر آن دمای آب شور برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده کمتر از حالت با مواد تغییرفازدهنده است. در این حالت به دلیل احتمال تماس بیشتر سیال‌کاری با سطح درونی لوله دریافت-کننده عدد ناسلت افزایش یافته و به تبع آن جذب حرارت بهبود می-یابد. تحقیقات در مورد ویژگی‌های حرارتی جمع‌کننده‌های سهموی نتایج مشابه را گزارش کرده‌اند (Zhao, Liu, & Zhang, 2009; Li, Li, Pei, Munir, & Ji, 2016, Muñoz, Rovira, Sánchez, & Montes, 2017, Jean, Brown, Jaffe, Buonassisi, & Bulovic, 2015).

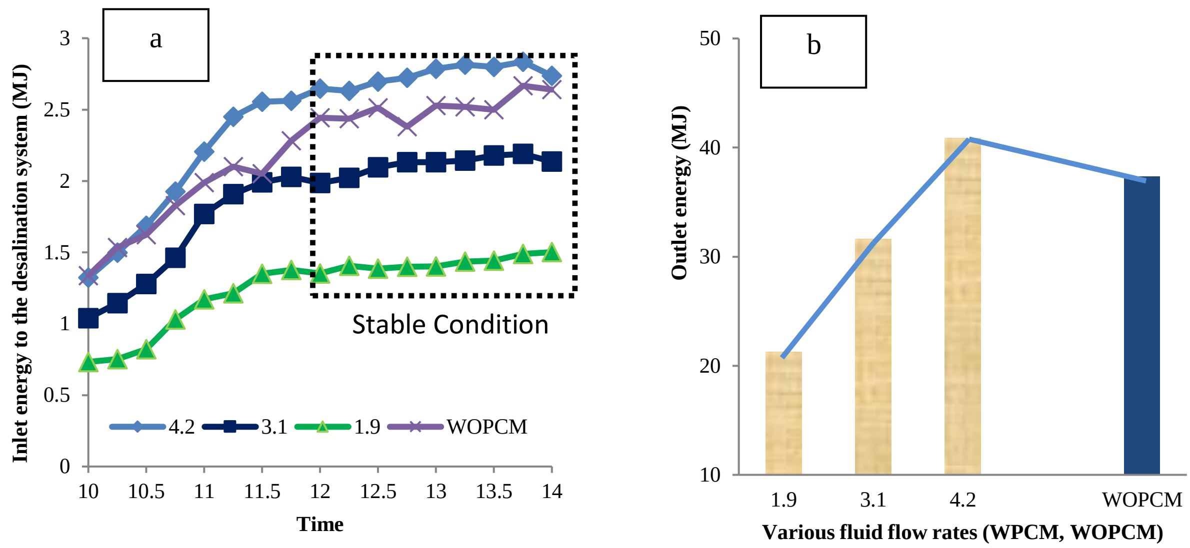



**شکل ٦**- تغییرات دمای آب داخل محفظه تقطیر: الف) برای شرایط مختلف از جریان سیال و ب) برای دوحالت با تغییرفازدهنده و بدون تغییرفازدهنده با جریان سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه

**Fig.6.** Changes of water temperature inside the distillation chamber: a) for different fluid flows and b) for two conditions with (4.2) and without (WOPCM) phase changer and fluid flow of 4.2 l min$^{-1}$

در شکل ۷–الف انرژی گرمایی واردشده به مخزن از طریق جمع‌کننده سهموی برای سه نوع جریان سیال و برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده نشان داده شده است. برای هر سه دبی ۴/۲، ۳/۱ و ۱/۹ لیتر بر دقیقه لوله ماریپچ حاوی پارافین، درون لوله دریافت‌کننده انرژی خورشیدی قرار دارد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که روند تغییرات میزان انرژی حرارتی ورودی مانند دمای آب شور در سامانه متغیر بوده و با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش می‌یابد. میزان انرژی حرارتی از ساعات ابتدایی داده‌برداری افزایش یافته و پس از آن با کاهش شدت تابش خورشیدی از ساعت ۱۳:۳۰ روند کاهشی به خود می‌گیرد. میزان دریافت انرژی حرارتی در حالی که دبی سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد، به‌صورت افزایشی می‌باشد. به این دلیل که با افزایش سرعت جریان سیال، انرژی حرارتی دریافت‌شده به‌وسیله لوله، از چرخه خارج شده و مستقیما وارد محفظه می‌گردد. در دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه، دمای سطح بیرونی لوله جاذب بیشتر از حالت‌هایی است که دبی سیال بیشتر است. در دبی‌های بالاتر دمای سطح بیرونی لوله با جریان بیشتر سیال کاری در درون لوله جاذب، کاهش یافته و حتی‌الامکان به آب شور درون محفظه انتقال می‌یابد. انرژی ورودی به مخزن برای دبی‌های ۴/۲، ۳/۱ و ۱/۹ لیتر بر دقیقه از ۱/۵۳ تا ۲/۸۳، ۱/۱۴ تا ۲/۱۸ و ۰/۷۳ تا ۱/۴۸ مگاژول تغییر می‌کند. علاوه بر آن در شکل ۷–الف تغییرات انرژی حرارتی ورودی به محفظه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در حالتی که لوله دریافت‌کننده بدون مواد تغییرفازدهنده است، نشان داده شده است. در این نمودار نیز مشخص است که در ساعات ابتدایی بخشی از انرژی حرارتی تولیدی صرف افزایش دمای مواد تغییرفازدهنده می‌شود (تقریبا ۰/۰۳۸ مگاژول) اما پس از آن روند افزایشی به خود می‌گیرد. همچنین با توجه به نمودار، نوسانات انرژی حرارتی برای حالتی که سامانه بدون مواد تغییرفازدهنده کار می‌کند به دلیل عدم انرژی‌گیری و آزادسازی مداوم سامانه، بیشتر است (Alimohammadi *et al.*, 2020, Muñoz *et al.*, 2017, Jean *et al.*, 2015). همچنین در شکل ۷–ب مجموع انرژی حرارتی خروجی از جمع‌کننده در شرایط مختلف از سامانه نشان داده شده است. میزان گرمای جذب‌شده توسط سامانه با افزایش دبی جریان سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه از ۲۱/۲۶ تا ۴۰/۸۷ مگاژول افزایش می‌یابد. انرژی حرارتی برای سامانه با مواد تغییرفازدهنده بیشتر از حالت بدون مواد تغییرفازدهنده با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه است. انرژی حرارتی ورودی در این حالت ۳۷/۳۶ مگاژول (۳/۵۱ مگاژول) است.

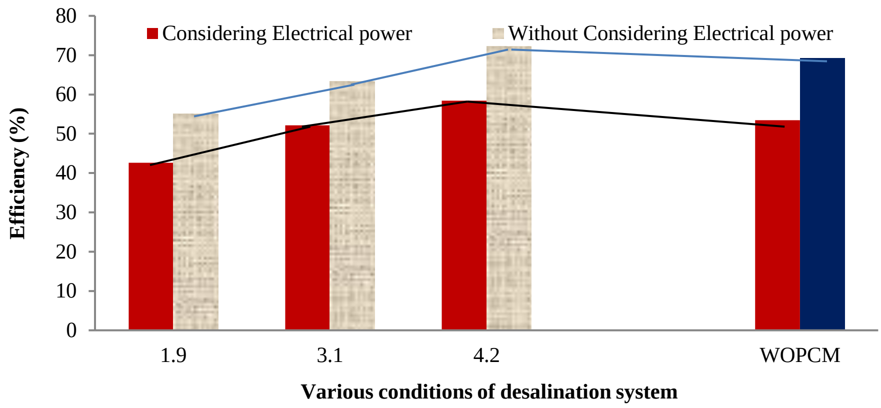



**شکل ۷**– الف) تغییرات انرژی حرارتی ورودی و ب) انرژی کل ورودی به محفظه آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای دبی‌های مختلف از سیال کاری و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده نسبت به زمان

**Fig.7.** a) Variations of input thermal energy and b) total input energy to the solar water softener chamber for different flow rates of the working fluid and the state without phase-changing materials in relation to time

یکی از عوامل مهمی که عملکرد مناسب یک سامانه خورشیدی را تعیین می‌کند، بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی است. تغییرات بازده و بهره‌وری انرژی گرمایی جمع‌کننده خورشیدی لوله سهموی، با و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی که برای به جریان درآوردن سیال استفاده می‌گردد، در شکل ۸ نشان داده شده است. بازده حرارتی در هر دو حالت با افزایش جریان سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه

افزایش یافته و از ۴۲/۶۳ درصد به ۵۸/۴۲ درصد رسید. این مقادیر برای هر دبی سیال با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی مصرفی در سامانه کمتر است. در حالتی که دبی جریان سیال بیشینه است، توان الکتریکی بیشتری مورد مصرف قرار می‌گیرد، بنابراین بازده حرارتی نیز افت پیدا می‌کند. برای سامانه‌ای که از مواد تغییرفازدهنده استفاده نشده است با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و شرایط یکسان، بازده حرارتی در هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی کمتر است (۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد). با توجه به این‌که در این تحقیق انرژی الکتریکی برای پمپ و الکتروموتور مصرف می‌گردد، در صورتی‌که انرژی حرارتی تولیدی در مقایسه با انرژی الکتریکی مصرفی کمتر باشد، بازده سامانه به شدت کاهش می‌یابد. به این دلیل بازده سامانه در همه حالت‌ها کمتر از شرایطی است که انرژی الکتریکی در نظر گرفته نشده است. در تحقیقات مشابه استفاده از نانو سیال باعث بهبود کارایی جمع‌کننده سهموی گردید (Khosravi, Malekan, & Assad, 2019; Alimohammadi *et al*., 2020). سایر محققان که از سامانه‌های خورشیدی برای تأمین انرژی گرمایی در آب‌شیرین‌کن‌ها استفاده نموده‌اند، نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند (Lim *et al*., 2016, Cheng & Zhan, 2016).



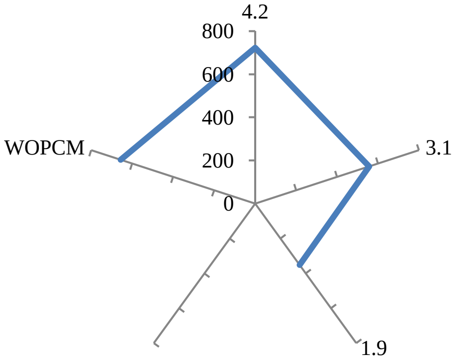

**شکل ۸**- تغییرات بازده جمع‌کننده خورشیدی با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی
**Fig.8.** Collector efficiency variations with and without considering electrical energy

### میزان آب شیرین تولیدی

در شکل ۹ میزان آب تولیدی برای هر آزمایش نشان داده شده است. لازم به ذکر است جمع‌آوری آب از زمان شروع آزمایش و تا صبح روز بعد (قبل از شروع آزمایش بعدی) صورت می‌پذیرفت. با توجه به این‌که راندمان حرارتی برای دبی جریان سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه بیشتر از دبی‌های دیگر بوده است، بنابراین میزان دریافت آب شیرین در این حالت نیز بیشترین میزان خواهد بود. آب تولیدی برای دبی‌های ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌ترتیب ۳۵۱، ۵۵۷ و ۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت می‌باشد. مقدار آب تولیدی سامانه از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ و به مدت ۴ ساعت می‌باشد. در صورتی‌که بتوان سامانه را از ساعت ۷:۰۰ (طلوع آفتاب) تا ساعت ۲۰:۰۰ (غروب آفتاب) به‌کار انداخت (حداقل به مدت ۱۰ ساعت)، میزان آب شیرین خروجی از سامانه نیز افزایش خواهد داشت. لازم به یادآوری است که برای حفظ مواد معدنی مفید، سعی گردید آب در دماهای کمتر از ۸۰ درجه سلسیوس بخار شود. همچنین در شکل ۹ میزان آب خروجی از سامانه هنگامی که لوله بدون مواد تغییرفازدهنده و دبی جریان سیال کاری ۴/۲ لیتر بر دقیقه است، نشان داده شده است. آب خروجی ۶۵۶ لیتر بر مترمربع است که با توجه به عدم وجود لوله مارپیچ با پارافین درون لوله جاذب گرما و کاهش عدد ناسلت، کمتر از حالت با مواد تغییرفازدهنده است. این حالت باعث می‌شد که ضریب انتقال حرارت همرفت درون لوله دریافت‌کننده تابش خورشیدی کاهش یافته و انرژی از اطراف لوله تلف شود. بنابراین دمای سیال کاهش یافته و سرعت تبخیر کمتر شود.

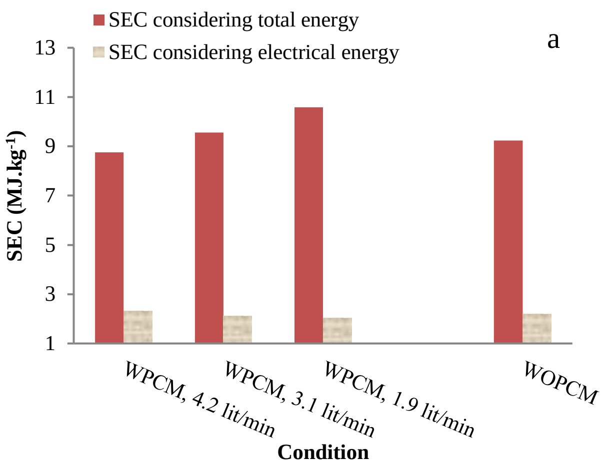
### بازده آب‌شیرین‌کن و مصرف انرژی ویژه (SEC)

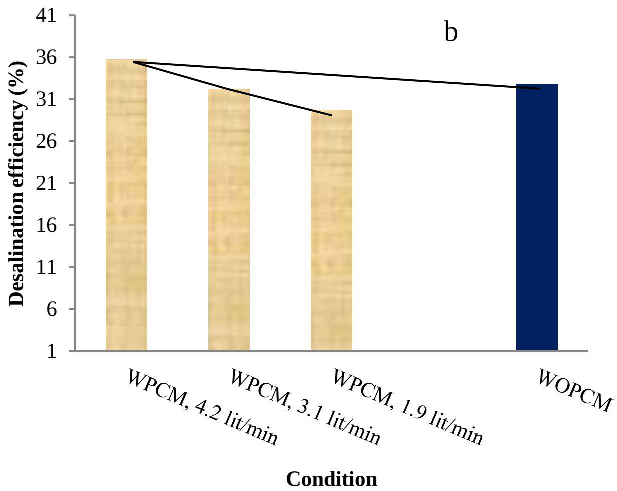
برای ارزیابی عملکرد سامانه خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییرفازدهنده و سامانه جریان بازگشتی از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود که مصرف انرژی ویژه SEC و راندمان کلی دو پارامتر معروف برای این منظور هستند. با توجه به شکل ۱۰- الف، واضح است که SEC برای سیستم بدون PCM بیشتر از سایر موارد است و در حالت با ماده تغییرفازدهنده مقدار آن کاهش می‌یابد. به این معنی که با وجود PCM، انرژی حرارتی و الکتریکی مورد نیاز برای تبخیر ۱ کیلوگرم آب، کاهش محسوسی می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش سرعت جریان سیال از ۱/۹ به ۴/۲ لیتر بر دقیقه در سامانه، SEC کاهش می‌یابد.




**شکل ۹**– میزان آب تولیدی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی
**Fig.9.** The amount of fresh water produced by solar desalination

اما در این حین میزان مصرف انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۱۰–الف تغییرات SEC را برای سامانه بدون در نظر گرفتن انرژی حرارتی جمع‌آوری‌شده توسط جمع‌کننده (به‌عنوان انرژی رایگان) برای بررسی تأثیر سایر منابع انرژی بر تبخیر شدن آب را نشان می‌دهد. در این حالت، برای شرایط مختلف تولید آب شیرین، مقادیر آن از ۲/۰۴ تا ۲/۳۵ مگاژول بر کیلوگرم تغییر می‌یابد. این مقدار برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده ۲/۲۰ مگاژول بر کیلوگرم حاصل شد. علاوه بر این، راندمان کلی سامانه تبخیرکننده با و بدون PCM در شکل ۱۰–ب نشان داده شده است. مطابق شکل، مشخص است که با افزایش سرعت جریان سیال، بازده تبخیر نمودن آب شور به دلیل کاهش زمان و انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. در این حالت مصرف انرژی الکتریکی به‌وسیله پمپ (برای جریان سیال در سامانه تبخیرکننده و جمع‌کننده خورشیدی) و انرژی حرارتی ورودی کاهش می‌یابد. بیشترین بازده به میزان ۳۵/۷۲٪ و کمترین آن ۲۹/۷۰٪ به‌ترتیب برای دبی ۱/۹ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌دست آمد. بازده تبخیر نمودن آب شور توسط سامانه با استفاده از ماده تغییرفازدهنده به دلیل بیشتر بودن مجموع انرژی حرارتی ورودی به سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی حداقل به میزان ۸/۱ درصد بهبود پیدا کرد. وجود ماده تغییرفازدهنده باعث می‌شد، انرژی خروجی از جمع‌کننده خورشیدی به میزان ۹/۴۱ درصد افزایش یابد.




**شکل ۱۰**– الف) مقادیر SEC (با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی و انرژی کل)، ب) راندمان کلی آب شیرین کن خورشیدی در شرایط مختلف جریان هوا و فواصل مواد تغییرفازدهنده
**Fig.10.** a) SEC (considering electrical energy and total energy) and b) overall solar efficiency at different air flow conditions and phase change material distances

**ارزیابی کیفی آب مقطر به‌دست‌آمده**

برای ارزیابی کیفی آب مقطر حاصل از سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی سهموی، نمونه به آزمایشگاه تخصصی آب و پساب آزمایشگاه مرکزی دانشگاه کردستان انتقال داده شد. نمونه‌های خارج‌شده از سامانه برای عدم اثرگذاری مواد بر روی کیفیت آب در درون ظرف شیشه‌ای تمیز در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند (شکل ۱۱).





**شکل ۱۱**- نمونه آب خروجی از سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای کیفیت‌سنجی

**Fig.11.** Sample of the water output from the solar water desalination system for quality measurement

در جدول ۳ پارامترهای فیزیکی و شیمیایی حاصل از ارزیابی نمونه در آزمایشگاه، نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر مربوط به پارامترها می‌توان دریافت که میزان سختی و کل مواد جامد محلول در آب نمونه نسبت به آب شرب شهری به میزان قابل‌توجهی کاهش یافته‌اند. علاوه بر آن میزان اسیدیته که یکی از مشخصات آب شرب می‌باشد از ۸/۸ به ۶/۹ رسیده است. از طرف دیگر استفاده از سامانه باعث کاهش عناصر مفید نیز گردیده است. این عناصر شامل کلسیم، پتاسیم، منیزیم و سدیم هستند. میزان منیزیم مجاز برای آب شرب استاندارد بین ۱۰ تا ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر است. آب تقطیرشده منیزیم کمتری نسبت به حد استاندارد دارد. مقادیر کلسیم با در نظر گرفتن سختی کل نیز بایستی کمتر ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد (Alwan, Shcheklein, & Ali, 2021). برای پتاسیم و سدیم مقادیر مجاز به‌ترتیب بین ۵ تا ۱۰ و ۱ تا ۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (Yang *et al*., 2003; Khan *et al*., 2023). علاوه بر آن آب مقطر حاصل‌شده باعث حذف عنصر آهن به‌عنوان یک عنصر مضر در آب شده است. با توجه به مقادیر ذکرشده در جدول ۳ می‌توان دریافت که آب نمونه با کاهش مواد جامد محلول و سختی می‌تواند برای مصرف به‌صورت شرب مورد استفاده قرار گیرد.

**جدول ۳**- مقادیر مربوط به عناصر تشکیل‌دهنده برای آب حاصل از سامانه و آب شرب

**Table 3-** Values of constituent elements for sample water and drinking water

| Element | مقدار کیفی یا کمی<br>Quality or Quantity ($mg\ l^{-1}$)<br>آب شرب خام<br>Tap water | <br><br>آب نمونه<br>Sample water | عنصر |
|---|---|---|---|
| Calcium | 17 | 6 | کلسیم |
| Nitrates | 1.65 | 0.3 | نیترات |
| Iron | 1.2 | 0 | آهن |
| Total Hardness | 556 | 10.17 | سختی کل |
| Potassium | 1.36 | 1.1 | پتاسیم |
| Magnesium | 12 | 2.5 | منیزیم |
| Sodium | 4.2 | 0.1 | سدیم |
| PH | 8.8 | 6.9 | اسیدیته |
| Salt | 0.15 | 0 | نمک |
| Total dissolved solids | 426 | 76 | کل مواد جامد محلول |

### کارایی استفاده از سامانه تعقیب‌کننده پنلی

همان‌طور که اشاره شد یکی از نوآوری‌های قابل‌توجهی که در این سامانه قرار داده شد، استفاده از سامانه تعقیب‌کننده پنلی بود. در این سامانه از دو پنل خورشیدی ۱۰ وات و یک مدار آردوینو استفاده گردید. در سامانه پیشین از حس‌گرهای فتوسل برای برآورده نمودن تعقیب خورشیدی استفاده شده بود. سامانه مذکور به دلیل عدم حساسیت قابل‌توجه و عدم واکنش‌پذیری در مقابل تغییرات اندک تابش خورشیدی در روزهای ابری راندمان حرارتی پایینی داشت. در شرایط مشابه متوسط راندمان حرارتی از ساعت ۱۰:۰۰ تا ساعت ۱۴:۰۰ در سرعت جریان سیال، برای سامانه اولیه (با فتوسل) ۴۸/۵۶ درصد به‌دست‌آمده بود، این در حالی است که برای سامانه حاضر این راندمان ۵۸/۴۲ درصد حاصل شد. کوچک ترین انحراف از خط کانونی جمع‌کننده سهموی باعث افت حرارتی سامانه می‌گردد. بنابراین می‌توان دریافت استفاده از پنل‌های خورشیدی باعث بهبود کارایی حرارتی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شده است.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روند تغییرات حرارتی درون سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از PCM در سه دبی سیال ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه با لوله مارپیچ به گام ۷ سانتی‌متر پرداخته شده است. برای بهبود کارایی سیستم از سامانه تعقیب‌کننده خورشیدی پنلی استفاده شد. نتایج زیر از این پژوهش به‌دست آمد:

قرارگیری ماده تغییرفازدهنده در داخل لوله، باعث شد بازده حرارتی و کارایی سامانه نسبت به حالت بدون مواد تغییرفازدهنده بهبود یابد.

دمای آب شور داخل لوله در حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاده می‌شود، نسبت به حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاه نمی‌شود، بیشتر بود. یشترین دمای آب شور در حالت استفاده از ماده تغییرفازدهنده برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن برای دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه می‌باشد.

بیشترین انرژی حرارتی ورودی برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه با مقدار ۳۷/۳۶ مگاژول (۳/۵۱ مگاژول) است.

بازده حرارتی سامانه با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و شرایط یکسان، در حالت با و بدون مواد تغییرفازدهنده به‌ترتیب ۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد به‌دست آمد.

مقدار تولیدی آب شیرین با دبی‌های ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌ترتیب ۳۵۱، ۵۵۷ و ۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت به‌دست آمد.

آب استحصال‌شده از سامانه دارای سختی کمتری نسبت به آب شرب معمولی بود. هرچند مواد آلی موجود در آن کاهش یافته بود.

استفاده از سامانه تعقیب‌کننده پنلی باعث شد بازده حرارتی سامانه به میزان ۹/۸۶ درصد بهبود یابد.

## References


1. Abdessemed, A., Bougriou, Ch., Guerraiche, D., & Abachi, R. (2018). Effects of tray shape of a multi-stage solar still coupled to a parabolic concentrating solar collector in Algeria. *Renewable Energy*, *132*, 1134-1140. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.074
2. Abu-Arabi, M., Al-harahsheh, M., Mousa, H., & Alzghoul, Z. (2018). Theoretical investigation of solar desalination with solar still having phase change material and connected to a solar collector. *Desalination*, *448*, 60-68. https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.09.020
3. Alimohammadi, Z., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2020). Thermal analysis of a solar dryer equipped with PTSC and PCM using experimental and numerical methods. *Solar Energy*, *201*, 157-177. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.079
4. Alwan, N. T., Shcheklein, S. E., & Ali, O. M. (2021). Evaluation of distilled water quality and production costs from a modified solar still integrated with an outdoor solar water heater. *Case Studies in Thermal Engineering*, *27*, 101216. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101216
5. Bakos, G. C. (2006). Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, *31*, 2411-2421. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008
6. Chaabane, M., Mhiri, H., & Bournot, P. (2014). Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with phase change materials (PCM). *Energy Conversion and Management*, *78*, 897-903. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.089
7. Cheng, P., & Zhan, X. (2016). Stability of organic solar cells: challenges and strategies. *Chemical Society Reviews*, *45*, 25442582. https://doi.org/10.1039/C5CS00593
8. Duong, H. C., Cooper, P., Nelemans, B., Cath, T. Y., & Nghiem, L. D. (2015). Optimising thermal efficiency of direct contact membrane distillation by brine recycling for small-scale seawater desalination, *Desalination*, *374*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.009
9. Edalati, S., Ameri, M., & Iranmanesh, M. (2015). Comparative performance investigation of mono-and poly-

crystalline silicon photovoltaic modules for use in grid-connected photovoltaic systems in dry climates. *Applied Energy*, *160*, 255-265. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.064

10. Elarem, R., Alqahtani, T., Mellouli, S., Aich, W., Ben Khedher, N., Kolsi, L., & Jemni, A. (2021). Numerical study of an evacuated tube solar collector incorporating a nano-pcm as a latent heat storage system. *Case Studies in Thermal Engineering*, *24*, 1000859. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100859
11. Eltawil, M., Mostafa, A., Azam, M., & Alghannam, A. O. (2018). Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*, *116*, 594-605. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.007
12. Esakkimuthu, S., Hassabou, A. H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J., & Velraj, R. (2013). Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Solar Energy*, *88*, 144-153. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.006
13. Goudarzi, K., Shojaeizadeh, E., & Nejati, F. (2014). An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO–$H_2O$ nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector. *Applied Thermal Engineering*, *73*, 1236-1243. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.067
14. Goyal, R. K., Tiwari, G. N., & Garg, H. P. (1998). Effect of thermal storage on the performance of an air collector: a periodic analysis. *Energy Conversion Management*, *39*, 193-202. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00226-9
15. Jean, J., Brown, P. R., Jaffe, R. L., Buonassisi, T., & Bulovic, V. (2015). Pathways for solar photovoltaics. *Energy and Environmental Science*, *8*, 1200-1219. https://doi.org/10.1039/C4EE04073B
16. Kalogirou, S. A. (2005). Use of artificial intelligence for the optimal design of solar systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, *22*, 90-103. https://doi.org/10.1504/IJCAT.2005.006940
17. Khosravi, A., Malekan, M., & Assad, M. E. H. (2019). Numerical analysis of magnetic field effects on the heat transfer enhancement in ferrofluids for a parabolic trough solar collector. *Renewable Energy*, *134*, 54-63. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.015
18. Khan, Z. U., Moronshing, M., Shestakova, M., Al-Othman, A., Sillanpaa, M., Zhan, Z., Song, B., & Lei, Y. (2023). Electro-deionization (EDI) technology for enhanced water treatment and desalination: A review. *Desalination*, *548*, 116254. https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116254
19. Koca, A., Oztopb, H. F., Koyunc, T., & Varol, Y. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, *33*, 567-574. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.012
20. Kumar, B. S., Vijayan, V., & Baskar, N. (2016). Burr dimension analysis on varic material for conventionally and CNC drilled holes. *Mechanical Engineering*, *20*, 347-354.
21. Li, P., Li, J., Pei, G., Munir, A., & Ji, J. (2016). A cascade organic Rankine cycle power generation system using hybrid solar energy and liquefied natural gas. *Solar Energy*, *127*, 136-146. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.029
22. Lim, E. L., Yap, C. C., Teridi, M. A. M., Teh, C. H., Mohd Yusoff, A. R., & Jumali, M. H. H. (2016). A review of recent plasmonic nanoparticles incorporated P3HT: PCBM organic thin film solar cells. *Organic Electronics*, *36*, 12-28. https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.05.029
23. Morad, M., El-Maghawry, H. A., & Wasfy, K. I. (2017). A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity. *Solar Energy*, *146*, 20-29. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.002
24. Motevali, A. (2013). Design and Evaluation of a Parabolic Sun Tracking Collector for Drying of Mint [Ph.D. Thesis.], TarbiatModares University, Tehran, Iran.
25. Mousa, H., & Abu Arabi, M. (2012). Desalination and hot water Production using solar still enhanced dy external solar collector. *Desalination Water Treat*, *51*, 1296-1301. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.699237
26. Muñoz, M., Rovira, A., Sánchez, C., & Montes, M. J. (2017). Off-design analysis of a hybrid Rankine-brayton cycle used as the power block of a solar thermal power plant. *Energy*, *134*, 369-381. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.014
27. Nasri, B., Benatiallah, A., Kalloum, S., & Benatiallah, D. (2019). Improvement of glass solar still performance using locally available materials in the southern region of Algeria. *Groundwater for Sustainable Development*, *9*, 100213. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100213
28. Panchal, H., Patel, K., Elkelawy, M., & Bastawissi, H. A. E. (2019). A use of various phase change materials on the performance of solar still: a review. *International Jornal of Ambient Energy*, *125*, 1-6. https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1594376
29. Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Material Science*, *65*, 67-123. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005
30. Rehman, H. M., Shakir, S., Razaq, A., Saqib, H., & Tahir, S. (2018). *Decentralized and cost-effective solar water purification system for remote communities*. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 154. https://doi.org/10.1088/1755-1315/154/1/012004
31. Rehman, S. H., & Mohandes, M. (2008). Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity. *Energy Policy*, *36*, 571-576. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.09.033

32. Reif, J. H., & Alhalabi, W. (2015). Solar-thermal powered desalination: Its significant challenges and potential. Renewable *and Sustainable Energy Reviews*, *48*, 152-165. https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.009
33. Rostamizadeh, M., Khanlarkhani, M., & Sadrameli, S. M. (2012). Sadrameli, Simulation of energy storage system with phase change material (PCM). *Energy and Buildings*, *49*, 419-422. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.037
34. Serale, G., Goia, F., & Perino, M. (2016). Numerical model and simulation of a solar thermal collector with slurry Phase Change Material (PCM) as the heat transfer fluid. *Solar Energy*, *134*, 429-444. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.030
35. Yang, L., Zhang, X., & Xu, G. (2014). Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points. *Renewable Energy*, *64*, 26-33. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.045
36. Zhao, M., Liu, Z., & Zhang, Q. (2009). *Feasibility analysis of constructing parabolic trough solar thermal power plant in inner Mongolia of China*. In: Proc. Asia– Pacific power and energy engineering conference, 1-4. https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918378